

Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) EP 1 014 054 A2

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
28.06.2000 Patentblatt 2000/26

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: G01H 1/00

(21) Anmeldenummer: 99125687.6

(22) Anmeldetag: 22.12.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder:  
• Zöller, Rolf, Dr.  
64380 Rossdorf (DE)  
• Reine, Frank, Dr.  
60594 Frankfurt am Main (DE)  
• Weigel, Manfred, Dr.  
64846 Gross-Zimmern (DE)

(30) Priorität: 24.12.1998 DE 19860333

(71) Anmelder: Schenck Vibro GmbH  
64293 Darmstadt (DE)

(74) Vertreter:  
Behrens, Helmut, Dipl.-Ing.  
Im Tiefen See 45 a  
64293 Darmstadt (DE)

(54) **Verfahren zur modellbasierten schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierenden Maschinen**

(57) Bei einem Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen sollen die Zusammenhänge zwischen Schwingungsverhalten der Maschine und Betriebsparametern bei Reduktion des Aufwandes exakter zu bestimmen sein. Dies wird durch ein modellbasiertes Verfahren, das mehrere Schritte der Modellbildung umfaßt, erreicht.

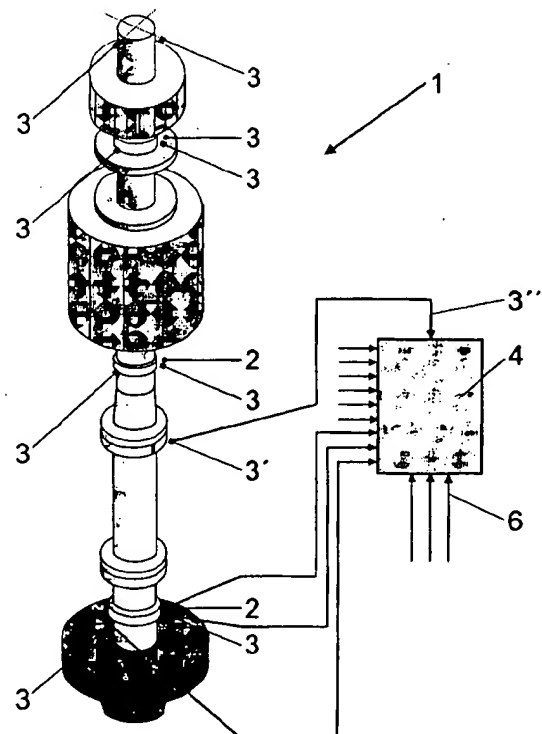


Fig. 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur modellbasierten schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen.

[0002] Die Hauptaufgabe eines Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung des Zustandes von rotierenden Maschinen besteht darin, möglichst ohne Betriebsunterbrechung eine Beurteilung des aktuellen Maschinenzustandes, der Belastung der Maschine und jeglicher Veränderungen des Maschinenzustandes zu ermöglichen. Unter Maschinenzustand versteht man dabei die Bewertung des technischen Zustandes der Maschine auf der Basis der Gesamtheit der aktuellen Werte aller Schwingungsgrößen und Betriebsparameter. Schwingungsgrößen sind alle aus den Schwingungssignal-Zeitfunktionen ableitbaren Kenngrößen, beispielsweise Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit oder Spitzenwert des drehfrequenten Schwingweganteiles. Betriebsparameter sind beispielsweise Drehzahl, Leistung, Erregerstrom, Temperaturen und Drücke.

[0003] Eine Beurteilung des Maschinenzustandes, bei der eine qualitative Aussage über den technischen Zustand der Maschine getroffen wird, erfolgt durch Analyse der gemessenen Schwingungsgrößen unter Einbeziehung der Betriebsparameter.

[0004] Ein derartiges Verfahren ist aus der Druckschrift "VIBROCAM 5000, Das System zur diagnostischen Überwachung von Turbomaschinen, C081, der Carl Schenck AG" bekannt, das besonders für den Einsatz an Dampfturbosätzen, Gasturbinen, Turbopumpen, Turboverdichtern und Wasserkraftmaschinen geeignet ist.

[0005] Die Rotoren der genannten Maschinen bilden zusammen mit den Lagern und dem Fundament ein komplexes Feder-Masse-System. Das Schwingungsverhalten hängt stark vom Betriebsregime, von der Betriebsart, dem Betriebszustand und den Anstellungsbedingungen der Maschine ab, so daß für jede einzelne Meßstelle jeder Maschine betriebsart-, betriebsregime- und betriebszustandsabhängige, individuelle Schwingungsgrößen ermittelt und zur Beurteilung herangezogen werden müssen.

[0006] Unter Betriebsart versteht man die prinzipiell zu unterscheidenden Modi der Maschine, wie z.B. Hochlauf, Normalbetrieb und Auslauf. Ein Betriebsregime unterscheidet innerhalb einer Betriebsart mögliche unterschiedliche Arbeitsweisen wie z. B. Turbinenbetrieb, Pumpenbetrieb und Phasenschieberbetrieb bei Pumpspeichersätzen in Wasserkraftwerken. Der Betriebszustand wird durch die Werte der signifikanten Betriebsparameter in den Betriebsregimen charakterisiert.

[0007] Veränderungen im Schwingungsverhalten können z.B. durch Abnutzungen und Schäden, Überlastungen und Verformungen, durch Störungen in der normalen Betriebsweise und durch Einflüsse aus dem elektrischen Netz verursacht werden. Die Ursachen von Schwingungen werden dabei im wesentlichen nach ihren Erscheinungsmerkmalen charakterisiert. Den höchsten Informationsgehalt haben dabei die Frequenzen der dominierenden Signalanteile im Schwingungsspektrum und die Frequenzen der Signalanteile, bei denen Änderungen auftreten.

[0008] Bei dem bekannten Verfahren schwingungsdiagnostischer Überwachung erfolgt zunächst eine Erfassung von Schwingungsgrößen und der Betriebsparameter beim jeweiligen Betriebsregime und Betriebszustand, sowie eine Frequenzanalyse und Bildung von Kenngrößen, die das Schwingungsverhalten und seine Änderung charakterisieren. Anschließend wird in einer Lernphase der Normalbereich und das Normalverhalten der selektiven Kenngrößen im Schwankungsbereich der Betriebsparameter für alle Betriebsregime und Betriebszustände ermittelt. In dem nachfolgenden Schritt erfolgt dann ein Grenzwertvergleich der aktuellen selektiven Kenngrößen mit den entsprechenden Kenngrößen des Normalzustandes, so daß gegebenenfalls Alarmer ausgelöst bzw. sich anbahnende kritische Maschinenzustände rechtzeitig signalisiert werden können.

[0009] Aus der DE 37 25 123 ist weiterhin ein Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen, insbesondere thermischer Turbomaschinen bekannt. Bei diesem Verfahren werden als Schwingungsgrößen die zur Drehfrequenz harmonischen Signalanteile bei verschiedenen Zuständen erfaßt und in einem Zeigerspeicher abgelegt. Anschließend wird in einem Bezugswertspeicher das arithmetische Mittel für jeden Signalanteil abgelegt. In einem Überwachungsmodul wird dann der Differenzwert zwischen aktuellem Zustand und mittlerem Bezugszustand ermittelt, der dann mit dem Normalbereich verglichen wird. Zusätzlich können zum jeweiligen Meßpunkt die zugehörigen Betriebsparameter erfaßt werden. Mit Hilfe dieser Meßdaten wird dann in einem Regressator eine Funktion bereitgestellt, die den Bezugswert in Abhängigkeit von den Betriebsparametern vorausbestimmen kann.

[0010] Aus den oben beschriebenen Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen sind die Zusammenhänge zwischen Schwingungsverhalten der Maschine und den Betriebsparametern nur unzureichend ermittelbar. Weiterhin sind für die Schwingungsgrößen der unterschiedlichen Betriebsregime und Betriebszustände eine Vielzahl von Grenzwerten vorzugeben, was zu einer großen Datenmenge und einem erheblichen Arbeitsaufwand führt.

[0011] Aufgrund des bekannten Standes der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, die Zusammenhänge zwischen Schwingungsverhalten der Maschine und Betriebsparametern bei Reduktion des Aufwandes exakter zu bestimmen, um die Überwachung und Beurteilung des Maschinenzustandes zu verbessern.

[0012] Diese Aufgabe wird durch die in Patentanspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

[0013] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zur modellbasierten schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen wird es möglich, automatisch Abhängigkeiten der Schwingungen von Betriebsparametern zu ermitteln und anzuzeigen. Dies führt nicht nur zur erheblichen Reduktion der Datenmengen, die bei der bisherigen Überwachung gespeichert werden mußten, sondern gibt auch einen besseren Aufschluß über die Ursachen der Schwingungen. Veränderungen des Maschinenzustandes werden besser erkannt. Durch optimierte Einstellung der Betriebsparameter kann ein schwingungsärmerer Betrieb der Maschinen erreicht werden.

[0014] In einer Weiterentwicklung des Erfindungsgedankens ist vorgesehen, daß bei der Bewertung der relativen Abweichung der Schwingungsgrößen für alle Betriebsregime und Betriebszustände wenige oder ein einziger Kennwert vorgegeben wird. Hierdurch wird eine drastische Reduktion der sonst nötigen Anzahl von Grenzwerten für die Überwachung des Maschinenzustandes erreicht.

[0015] Die vorliegende Erfindung wird anhand der schwingungsdiagnostischen Überwachung eines Pumpspeichersatzes näher erläutert.

[0016] Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Darstellung des Wellenstrangs eines Pumpspeichersatzes mit den Meßstellen und der Datenverarbeitungseinheit;

Fig. 2: eine Darstellung der Lernphase in einem Blockschaltbild ;

Fig. 3: eine Darstellung der Betriebsphase in einem Blockschaltbild.

[0017] In Fig. 1 ist schematisch der Wellenstrang 1 eines Pumpspeichersatzes mit den Meßstellen zur Schwingungsmessung dargestellt. Den Lagerstellen und den Meßebenen für Wellenschwingungsmessungen sind jeweils Aufnehmer 2, 3 zur Erfassung von Schwingungssignalen zugeordnet. Die an den Meßstellen über die Aufnehmer 2, 3 ermittelten Schwingungssignale werden an eine Datenverarbeitungseinheit 4 weitergeleitet (dargestellt durch Pfeile 5). Gleichzeitig wird vom Wellenstrang 1 mittels Referenzaufnehmer 3' ein Referenzsignal 3" (ein Impuls pro Maschinenumdrehung) abgeleitet und der Datenverarbeitungseinheit 4 zugeführt. Zusätzlich sind eine Vielzahl von Aufnehmern vorgesehen, die die unterschiedlichen Betriebsparameter, wie beispielsweise Leistung, Erregerstrom, Drücke und Temperaturen, erfassen. Die Meßsignale für die Betriebsparameter werden ebenfalls an die Datenverarbeitungseinheit 4 weitergeleitet (dargestellt durch Pfeile 6). In der Datenverarbeitungseinheit 4 werden aus den Schwingungssignalen 5 und gegebenenfalls aus den Referenzsignalen 3" Schwingungsgrößen 5' ermittelt und abgespeichert oder zwischengespeichert. Gleichzeitig werden auch die Meßwerte für die Betriebsparameter 6' abgespeichert.

[0018] Grundlage des erfindungsgemäßen modellbasierten Verfahrens zur schwingungsdiagnostischen Überwachung bildet zunächst die Lernphase die in Fig. 2 schematisch dargestellt ist und in der eine Modellbildung in mehreren Schritten erfolgt.

[0019] Erstes Ziel der Modellbildung ist es festzustellen, ob alle Betriebsparameter meßtechnisch erfaßt sind, die das Schwingungsverhalten der Maschine entscheidend beeinflussen. Dies läßt sich durch Vorhersage der Schwingungsgrößen alleine aus den Betriebsparametern überprüfen. Ist es möglich, mit einer einfachen Abbildungsvorschrift aus den Parameterwerten hinreichend genau auf die Schwingungsgrößen zu schließen, so sind die gesuchten Informationen in den Daten repräsentiert. Dazu wird der Ansatz

$$\hat{y}_i = \hat{F}(x_i)$$

gemacht, wobei F die Modellfunktion bezeichnet. Ein möglicher Ansatz für F ist eine Linearkombination von i.a. nichtlinearen Basisfunktionen. Das Modell für einen Datenpunkt der Zielgröße  $y_i = y(it_s)$  ( $t_s$  : Abtastzeit) für einen beliebigen Zustandsvektor  $x_i$  ist dann gegeben durch

$$\hat{y}_i = \sum_j^M a_j X_j(x_i)$$

wobei  $X_j$  eine Basisfunktion des Modells darstellt.

[0020] In der Lernphase werden zunächst alle gemessenen und in der Datenverarbeitungseinheit gespeicherten Betriebsparameter 6' einer Vorwärtsauswahl-Einheit 7 übermittelt. Weiterhin werden die Schwingungsgrößen 5' übermittelt. Es wird zunächst von einem linearen Vorhersagemodell ausgegangen, das die zum Zustandsvektor  $\chi(i) = (x_1(i), x_2(i), \dots, x_d(i))$  zusammengefaßten Betriebsparameter 6' durch Linearkombination von dessen Komponenten

ten auf die Schwingungsgrößen  $y(i) = (y_1(i), y_2(i), \dots, x_1(i))$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$  abbildet. Anschließend erfolgt mit dem Verfahren der Vorwärts-Auswahl, das unten detailliert beschrieben ist, eine Bewertung der schwingungsbestimmenden Betriebsparameter auf Relevanz.

**[0021]** Die Auswahl der schwingungsbestimmenden Betriebsparameter wird so zurückgeführt auf ein Modellstruktur-Bestimmungsproblem, denn die einzelnen Betriebsparameter können als Terme eines Modells aufgefaßt werden und mittels Termauswahlverfahren diejenigen Terme ausgewählt werden, die zu einem optimalen Modell führen. Nur die Betriebsparameter, die auf diese Weise als relevant für die Vorhersage der Schwingungsgrößen erkannt werden, werden als Eingangsgrößen 8 einem Polynomgenerator 9 zugeführt. In dem Polynomgenerator 9 wird ein komplexeres und damit leistungsfähigeres Modell ermittelt. Komplexe Modelle lassen sich durch Hinzufügen von Potenztermen und Produkttermen realisieren. Diese Modelle nennt man Polynomiale Modelle. Die Auswahl der optimalen Modellterme aus einer vorgegebenen Obermenge ist wieder eine Form der Modellstrukturbestimmung und erfolgt durch Vorwärtsauswahl. In der darauffolgenden Vorwärtsauswahl-Einheit 11 wird die Struktur des Modells aus den Schwingungsgrößen 5' und der vom Polynomgenerator 9 zur Verfügung gestellten Basisfunktion 10 ermittelt. Anschließend erfolgt die Bestimmung der optimalen Parameter  $a_j$  durch das Minimieren der quadratischen Modellfehlersumme:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

in der darauffolgenden Least-Square Parameter Schätzungseinheit 13 anhand der zugeführten Schwingungsgrößen 5' und der ausgewählten Basisfunktion 12. Dies führt zu einem linearen Gleichungssystem, dessen Lösung die gesuchten Modellparameter 14 liefert.

**[0022]** Die Modellstruktur-Bestimmung erfolgt mit dem im folgenden beschriebenen Verfahren der Vorwärts-Auswahl, die in der Vorwärtsauswahl-Einheit 7 und 11 ausgeführt wird. Zu einer zunächst leeren Menge von Betriebsparametern wird schrittweise diejenige Größe hinzugenommen, die den quadratischen Fehler  $\chi^2$  am meisten verringert. Dadurch ergibt sich eine Rangfolge, die angibt, welche Betriebsparameter die Schwingungsgrößen am stärksten beeinflussen. Je mehr Betriebsparameter berücksichtigt werden, desto kleiner wird dieser quadratische Fehler  $\chi^2$ . Er bezieht sich jedoch nur auf die Daten der Lernphase (Trainingsdaten) und läßt keine Aussage darüber zu, wie das Modell auf unbekannte Daten (Testdaten) reagiert. Alleine ist der quadratische Fehler  $\chi^2$  damit zur Auswahl relevanter Terme ungeeignet.

**[0023]** Eine notwendige Aussage liefert die Abschätzung des sogenannten Vorhersagefehlers mit den Testdaten. Dieser gibt an, wie genau das trainierte Modell bei zukünftigen, unbekannten Daten vorhersagt. Falls ausreichende Datenmengen aus der Lernphase vorliegen, kann dies durch Aufteilung der Daten in eine Trainingsdatenmenge und Testdatenmenge erfolgen.

**[0024]** Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung einer sehr viel effizienteren Methode, die in der Statistik bekannt ist und mit "Cross-Validation" bezeichnet wird (B. Efron und R.J. Tibshirani "An Introduction to the Bootstrap", Chapman and Hall, 1993). Bei dieser Methode werden mehrere Aufteilungen in Trainings- und Testdatenmengen vorgenommen. Eine extreme Variante davon ist es, die N Datenpunkte in eine Trainingsdatenmenge der Größe N-1 und eine Testdatenmenge der Größe 1 aufzuteilen. Dieses Verfahren wird "Leave-One-Out(LOO)Cross-Validation" genannt. Das Auswahlkriterium  $\sigma^2$  ergibt sich dann als Durchschnitt der quadratischen Fehler bei Vorhersage der ausgelassenen Testdatensätze.

**[0025]** Sei  $F_i(x_i)$  die Vorhersage des i-ten Datensatzes, nachdem das Modell mit den anderen N-1 Datensätzen trainiert wurde, dann ergibt sich für den Testdatenfehler  $\sigma^2$ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{F}(x_i))^2$$

**[0026]** Der Vorteil dieser Methode ist zum einen, daß keine Beeinflussung des Mittelwertes durch die Aufteilung in Trainings- und Testdatenmenge entsteht und zum anderen, daß die gesamte Trainings- und Testdatenmenge zum Training verwendet werden kann.

**[0027]** Im Gegensatz zum quadratischen Fehler  $\chi^2$ , der angibt wie gut die Modellvorhersage mit den Trainingsdaten übereinstimmt, erhält man mit  $\sigma^2$  ein Maß für die Übereinstimmung bei unbekannten Datensätzen. Die zuvor eingeführte Fehlerfunktion  $\chi^2$  nimmt monoton mit Zunahme neuer Basisfunktionen ab und ist damit zur Auswahl relevanter Terme ungeeignet. Der LOO-Fehler  $\sigma^2$  jedoch, nimmt mit Hinzunahme neuer Basisfunktionen zunächst ab und steigt

ab einer kritischen Anzahl wieder an, da der Fehler zwischen den Datensätzen der Trainingsmenge zunimmt (Overfitting). Diese Eigenschaft wird zur Auswahl relevanter Terme genutzt.

[0028] Nachdem durch die Auswahl von geeigneten Betriebsparametern in der Vorwärtsauswahl-Einheit 7 eine Beschränkung auf einige wenige Größen 8 erfolgte, kann mit diesen in dem Polynomgenerator 9 eine erneute Modellbildung erfolgen, bei der ein nichtlineares und damit leistungsfähigeres Modell zum Einsatz kommt. Dieses Modell liefert dann die gewünschten funktionalen Zusammenhänge zwischen Schwingungsgrößen und Betriebsparametern.

[0029] Bei thermischen Turbomaschinen haben häufig die beiden Termen Wirkleistung ( $P(t)$ ) und Erregerstrom ( $I(t)$ ) die größte Relevanz.

[0030] Der allgemeine Ansatz eines Polynomialmodells der Ordnung 2 lautet:

$$\hat{s}(t) = a_0 + a_1 P(t) + a_2 P(t)^2 + a_3 I(t) + a_4 I(t)^2 + a_5 P(t) I(t) = \sum_{j=1}^6 a_j X_j(P(t), I(t))$$

[0031] Die Auswahl der relevanten Terme innerhalb dieses Modells erfolgt wieder mittels des bereits beschriebenen Verfahrens der Vorwärtsauswahl in der Vorwärtsauswahl-Einheit 11 und liefert einen kompakten, formelmäßigen Zusammenhang (wird nachfolgend als optimiertes Modell 12 bezeichnet) zwischen Schwingungsgrößen und den Betriebsparametern:

$$\hat{s}(t) = a_0 + a_1 P(t) + a_2 I(t)^2$$

[0032] Die Ermittlung der Werte für die Modellparameter  $a_0, a_1 + a_2$  14 erfolgt in der Least-Square Parameter Schätzungseinheit 13.

[0033] Ist die Modellfindung- und Bildung aus der Lernphase abgeschlossen, beginnt die Betriebsphase des Verfahrens. Die Betriebsphase ist schematisch anhand von Fig. 3 dargestellt. In dieser werden lediglich die zuvor ausgewählten Betriebsparameter 8 an das in der Lernphase optimierte Modell 12 übergeben. In der Recheneinheit 15 erfolgt dann die Vorgersage der Schwingungsgrößen nach dem oben beschriebenen Modellansatz unter Berücksichtigung der optimalen Modellparameter 14, die ebenfalls der Recheneinheit 15 zugeführt werden. Die vorhergesagten Schwingungsgrößen 16 werden einer Vergleichseinheit 17 zugeführt. Weiterhin werden die aktuell gemessenen Schwingungsgrößen 5" der Vergleichseinheit 17 zugeführt.

[0034] Ein Vergleich der vorhergesagten Schwingungsgrößen 16 mit den tatsächlich gemessenen Schwingungsgrößen 5" liefert zu jedem Zeitpunkt ein Maß für die Übereinstimmung zwischen Maschine und Modell und ist damit relevant für die Diagnose. Dabei ist der Betrag der relativen Abweichung ein Maß für signifikante Veränderungen des Maschinenzustandes. Dieser Wert kann als Ausgangswert 18 der Vergleichseinheit 17 einer Grenzwertvergleichseinheit 19 zugeführt werden. In der Grenzwertvergleichseinheit erfolgt der Vergleich der selektiven Abweichung 18 mit den vorgegebenen Grenzwerten 20. Es kann sich dabei um einige wenige oder nur um einen einzigen relativen Grenzwert handeln. Überschreitet die relative Abweichung 18 die vorgegebenen Grenzwerte 20, erfolgt die Abgabe eines Signals 21. Dieses kann z. B. für eine Alarmmeldung oder eine Datenarchivierung genutzt werden.

[0035] Das zuvor beschriebene erfindungsgemäße Verfahren eignet sich nun in einer weiteren Ausgestaltung dazu, Zusammenhänge anzugeben, die in gleichartigen Betriebsphasen isoliert gelten. Beispiele sind Vollastphasen, Schwachlastphasen oder Fehlerzustände. Dies macht es notwendig, die Datenmenge in natürliche Klassen einzuteilen, was hier automatisiert erfolgen kann. Dazu werden die Betriebsparameter einem Fuzzy-C-Means Clustering unterzogen (M.P. Windham "Geometrical fuzzy clustering algorithms", Fuzzy Sets and Systems, 10; 271-279, 1983). Dieses Verfahren führt zur Einteilung der Daten in n Klassen, wobei n je nach Anwendungsfall geeignet vorzugeben ist. Es erfolgt hiermit eine Segmentierung des Zeitbereichs in Segmente, in denen eine weitgehend stationäre Betriebsphase vorliegt. Die Modellierung erfolgt dann im weiteren innerhalb der Segmente und liefert die Zusammenhänge getrennt für jede Betriebsphase. Dies hat den Vorteil, Abhängigkeiten erkennen zu können, die lediglich in einer oder wenigen Betriebsphasen vorliegen, und Handlungsweisen speziell für diese Betriebsphasen (z.B. Vollastphase) ableiten zu können.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur modellbasierten schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen, bei dem in einer Lernphase zunächst Schwingungsgrößen und Betriebsparameter erfaßt und gespeichert werden und anschließend eine Modellbildung in mehreren Schritten erfolgt, wobei zuerst anhand eines einfachen, beispielsweise linearen Modells die zum Zustandsvektor  $x(i)$  zusammengefaßten Betriebsparameter durch Linearkombination von dessen Komponenten auf die Schwingungsgrößen  $y(i)$  abgebildet werden und durch Vergleich der gemessenen

und der vorhergesagten Schwingungsgrößen anhand des Modells zunächst überprüft wird, ob alle schwingungsrelevanten Größen erfaßt sind, anschließend mittels des Verfahrens der Vorwärtsauswahl eine Bewertung der Rangfolge der Betriebsparameter auf Relevanz erfolgt, dann mittels ausgewählten relevanten Betriebsparametern eine Modellbildung mit einem komplexen Modell erfolgt und dann mit dem Verfahren der Vorwärtsauswahl eine erneute Bewertung der Rangfolge der Betriebsparameter auf Relevanz erfolgt, so daß ein funktionaler Zusammenhang auf Basis eines komplexen Modells zwischen ausgewählten relevanten Betriebsparametern und Schwingungsgrößen ableitbar ist, in einer anschließenden Betriebsphase aktuelle Schwingungsgrößen und Betriebsparameter erfaßt werden und durch Bewertung der relativen Abweichung der aktuell gemessenen Schwingungsgrößen von den vom Modell vorhergesagten Schwingungsgrößen signifikante Veränderungen des Maschinenzustandes feststellbar sind.

2. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung nach Patentanspruch 1, wobei bei dem Verfahren der Vorwärtsauswahl die Bestimmung der relevanten Betriebsparameter durch Minimieren der quadratischen Modellfehlersumme erfolgt.
3. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung nach Patentanspruch 1, wobei der Abbruch des Verfahrens der Vorwärtsauswahl für die Bestimmung der relevanten Betriebsparameter durch das Leave-One-Out - Cross-Validation - oder durch andere Cross-Validation-Verfahren erfolgt.
4. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 1, wobei die signifikanten Veränderungen angezeigt und bewertet, für Alarmmeldungen, Datenspeicherungen und zur Abschaltung der Maschine genutzt werden
5. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 4, wobei wenn nach einer Bewertung der signifikanten Veränderungen auf anormale oder unzulässige Maschinenzustände geschlossen werden kann, eine Veränderung der relevanten Betriebsparameter auf Basis der Kenntnis der funktionalen Zusammenhänge zwischen relevanter Betriebsparameter und vorhergesagter Schwingungsgrößen erfolgt.
6. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 1, wobei bei der Bewertung der relativen Abweichung für alle Maschinenzustände wenige oder ein einziger Kennwert vorgegeben wird.
7. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 1, wobei Daten in stationäre Segmente unterteilt werden.
8. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 7, wobei die Unterteilung mit Fuzzy C-Means Clustering erfolgt.
9. Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen nach Patentanspruch 8, wobei für alle stationären Segmente jeweils eine Modellbildung erfolgt, so daß für alle stationären Segmente jeweils ein funktionaler Zusammenhang auf Basis eines komplexen Modells zwischen relevanter Betriebsparameter und Schwingungsgrößen ableitbar ist.

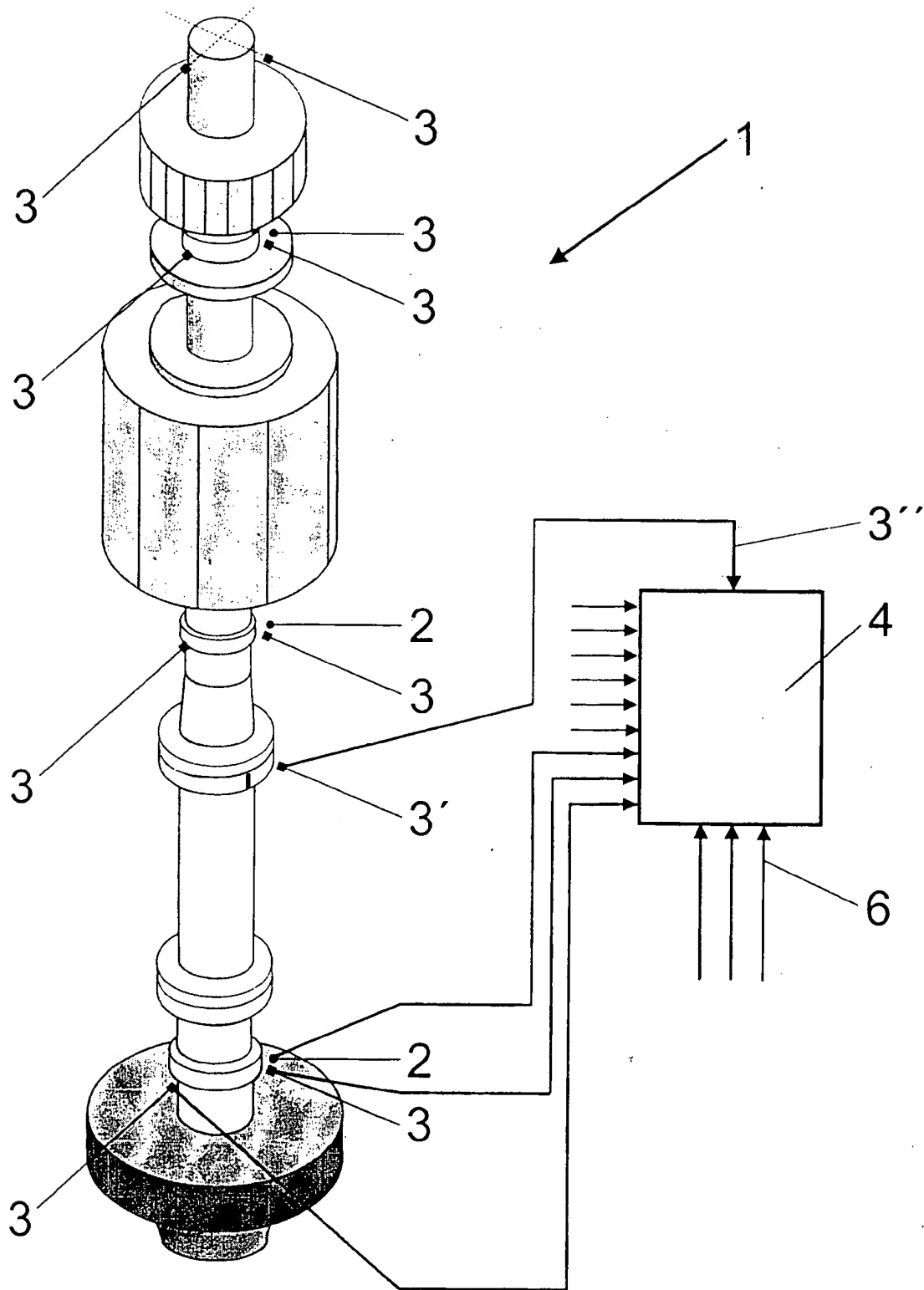


Fig. 1

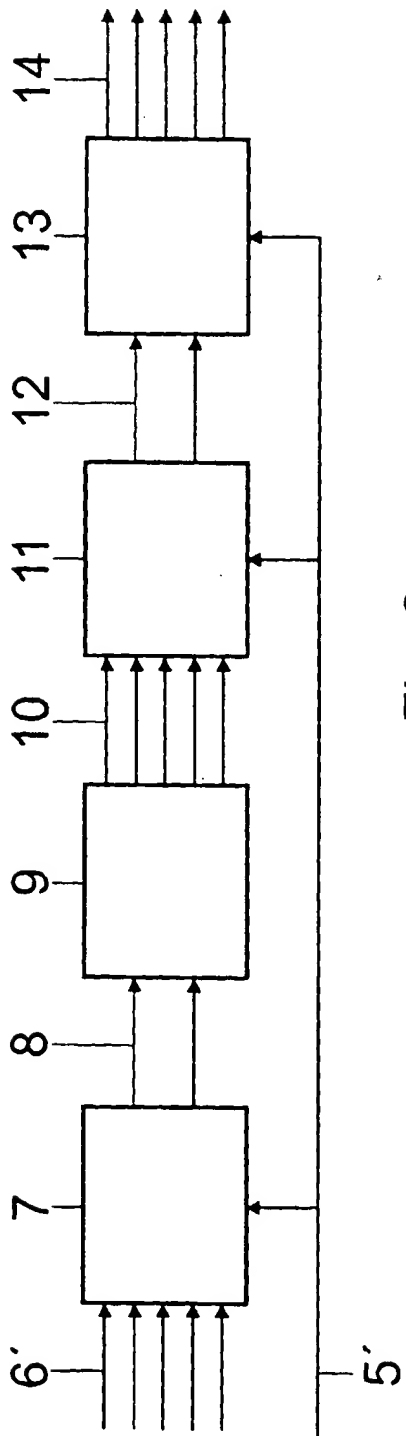


Fig. 2

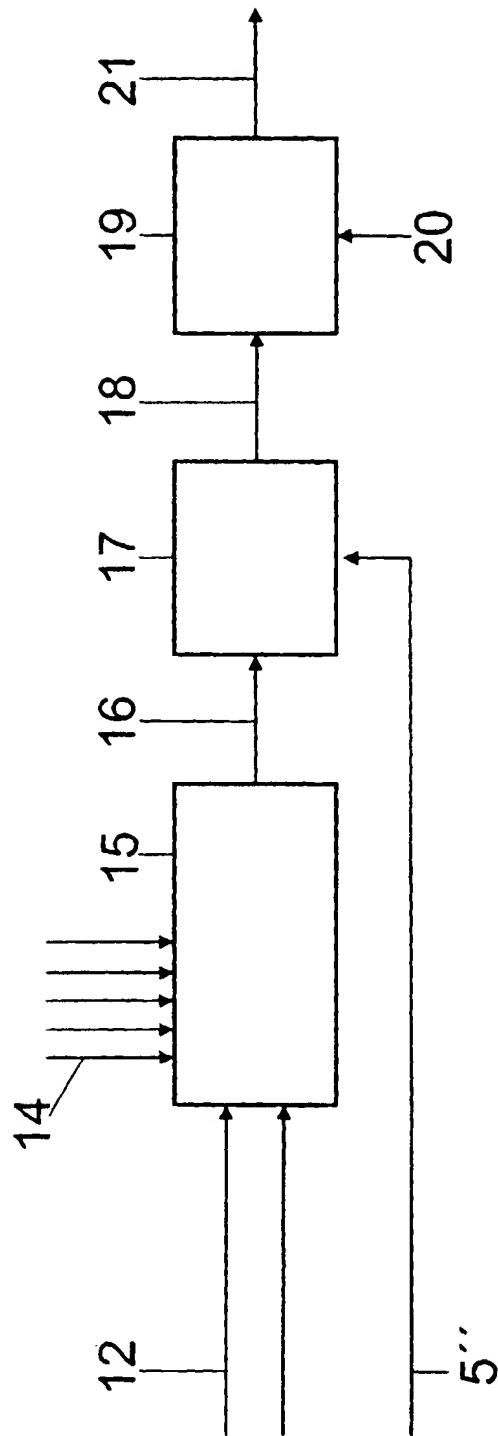
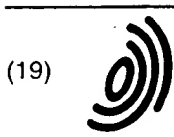


Fig. 3





Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

**EP 1 014 054 A3**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(88) Veröffentlichungstag A3:  
16.05.2001 Patentblatt 2001/20

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>: G01H 1/00, G06F 17/40

(43) Veröffentlichungstag A2:  
28.06.2000 Patentblatt 2000/26

(21) Anmeldenummer: 99125687.6

(22) Anmeldetag: 22.12.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorität: 24.12.1998 DE 19860333

(71) Anmelder: Schenck Vibro GmbH  
64293 Darmstadt (DE)

(72) Erfinder:  
• Zöller, Rolf, Dr.  
64380 Rossdorf (DE)  
• Reine, Frank, Dr.  
60594 Frankfurt am Main (DE)  
• Weigel, Manfred, Dr.  
64846 Gross-Zimmern (DE)

(74) Vertreter:  
Behrens, Helmut, Dipl.-Ing.  
Im Tiefen See 45 a  
64293 Darmstadt (DE)

### (54) Verfahren zur modellbasierten schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierenden Maschinen

(57) Bei einem Verfahren zur schwingungsdiagnostischen Überwachung rotierender Maschinen sollen die Zusammenhänge zwischen Schwingungsverhalten der Maschine und Betriebsparametern bei Reduktion des Aufwandes exakter zu bestimmen sein. Dies wird durch ein modellbasiertes Verfahren, das mehrere Schritte der Modellbildung umfaßt, erreicht.

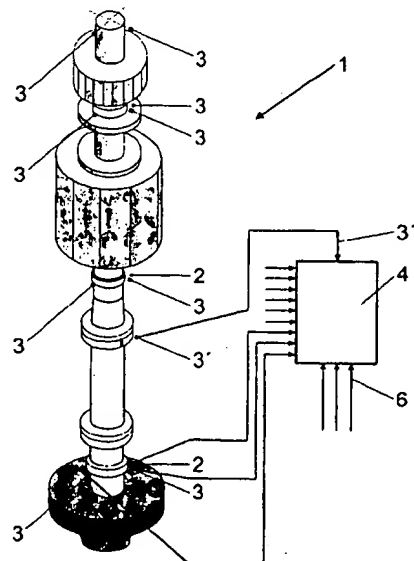


Fig. 1



Europäisches  
Patentamt

# EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 99 12 5687

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
D,A	DE 37 25 123 A (INST ENERGIEVERSORGUNG) 28. April 1988 (1988-04-28) * Spalte 4, letzter Absatz *	1	G01H1/00 G06F17/40
P,A	EP 0 933 622 A (SCHENCK VIBRO GMBH) 4. August 1999 (1999-08-04) * Spalte 6, Absatz 4 *	1	
A	US 5 748 508 A (BALEANU MICHAEL-ALIN) 5. Mai 1998 (1998-05-05) * Spalte 1, Zeile 21 - Spalte 5, Zeile 45 *	1	
A	DE 197 07 173 C (VOITH HYDRO GMBH) 23. Juli 1998 (1998-07-23) * Spalte 4, Absatz 2 *	1	
A	US 5 408 863 A (SAWYERS JAMES H ET AL) 25. April 1995 (1995-04-25) * Spalte 4, Zeile 5 - Spalte 5, Zeile 52; Abbildung 1 *	1	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.7)
			G01H G01M G06F
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>DEN HAAG</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>21. März 2001</b>	Prüfer <b>Häusser, T</b>
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X: von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y: von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A: technologischer Hintergrund O: nichtschriftliche Offenbarung P: Zwischenliteratur		T: der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E: älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D: in der Anmeldung angeführtes Dokument L: aus anderen Gründen angeführtes Dokument &: Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPC FORM 1503 03/82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT  
ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 99 12 5687

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.  
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am  
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

21-03-2001

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 3725123 A	28-04-1988	DD 255588 A	06-04-1988
EP 0933622 A	04-08-1999	DE 19803956 A	05-08-1999
US 5748508 A	05-05-1998	DE 4243882 C	05-01-1994
		DE 59306295 D	28-05-1997
		DK 676070 T	03-11-1997
		WO 9415268 A	07-07-1994
		EP 0676070 A	11-10-1995
		JP 8505249 T	04-06-1996
DE 19707173 C	23-07-1998	BR 9800742 A	24-10-2000
		EP 0860761 A	26-08-1998
		JP 10281860 A	23-10-1998
		US 6144923 A	07-11-2000
US 5408863 A	25-04-1995	KEINE	